

METODO INTERACTIVO PARA LA EXTRAPOLACION DE ONDAS SISMICAS. APLICACION A LA PROSPECCION GEOFISICA (PARTE II)

M. Gonzalez, E. Alarcón

Cátedra de Estructuras E.T.S.I.I. U.P.M.

Resumen. - Este artículo es continuación del publicado en el número 2 de la revista "Anales de Ingeniería Mecánica" - (diciembre 1982), sobre los métodos de análisis sísmico por reflexión. Como allí se indicó, con estos métodos se pretende determinar la geometría de los horizontes sísmicos en una determinada sección así como las características físicas de las interfases que separa. En el presente artículo se introducen mejoras en lo que se refiere a tiempo computacional y tipos de campos de velocidades.

INTRODUCCION

Un punto clave en el desarrollo de estos métodos de análisis sísmico por reflexión, es el conocimiento del campo de velocidades que, en general, es imposible determinar con precisión. Aunque el procedimiento que se acompaña esta originado fundamentalmente en la idea de alcanzar una autocorrección de la hipótesis de velocidades introducida, aquí se va a suponer que el campo de velocidades viene prefijado, de la forma descrita a continuación. La estimación de tipo puntual en una malla, en contraposición con el artículo anterior en el que empleábamos leyes analíticas con gradientes de velocidad horizontales o verticales. Ello permite recoger todas las particularidades que se precise simular, siendo necesaria además una hipótesis de interpolación entre nodos para que el campo quede completamente definido.

Como es sabido, el problema fundamental es triba en el proceso de transformación del diagrama $x-t$ dato, en un diagrama $x-z$ que indique la situación topográfica del reflector, este proceso es conocido como "emigración".

En el artículo anterior, el método empleado para la emigración, consistía en la integración de las ecuaciones del rayo mediante un método de predicción corrección.

El método es interesante, según se pudo comprobar con los ejemplos de aplicación; ahora bien, en un ambiente iterativo, es de capital im-

portancia el tiempo de resolución. En este sentido, el usuario elegirá a través del intervalo de integración, la precisión que deseaba, pero como este intervalo se mantenía constante a lo largo del proceso, podía ocurrir que para casos simples (vg.: velocidad constante) se tuviera un número de intervalos de integración muy superior a los necesarios y por lo tanto que el tiempo de resolución aumentara innecesariamente. Ello, unido a lo dicho anteriormente sobre el campo general de velocidades, nos ha impulsado al nuevo método.

Si las velocidades se definen por puntos, el método debe comenzar por una interpolación. Entre los métodos empleados, el más popular es el uso de splines cúbicos.

Conviene observar que si se supone una interpolación de tipo lineal, ello equivale a que la malla venga definida por elementos triangulares, lo que implica que dentro de cada triángulo los gradientes de velocidades son constantes o nulos. En el primer caso, la trayectoria del rayo son arcos de circunferencia y en el segundo, las trayectorias son rectas. Ambos casos admiten un tratamiento analítico mediante el que se puede conocer el punto de entrada y el de salida en cada triángulo.

El problema puede verse como la fijación automática por el propio campo de velocidades del número de intervalos de integración, siendo resueltos los casos sencillos por un número de pasos proporcional a las variaciones supuestas en velocidad.

No es posible dar normas generales para disponer los elementos en la malla, según sea el campo de velocidades, pero para un operador experimentado, no debe constituir ningún problema la elección del número de elementos y el tamaño de los mismos.

Los siguientes ejemplos vienen a confirmar lo anteriormente dicho.

Las figuras 1 y 2, constituyen el primer ejemplo, en el que se observa un posible tipo de malla (fig. 2) para un campo de velocidades sencillo (fig. 1).

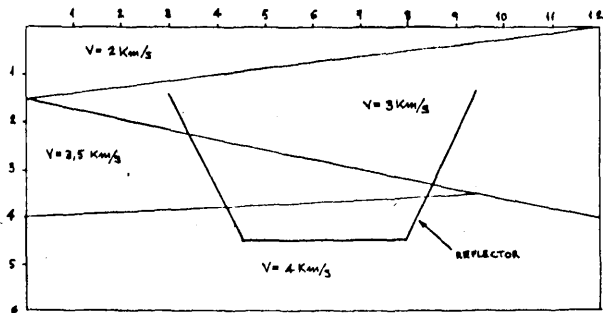


Fig. 1- CAMPO DE VELOCIDADES.

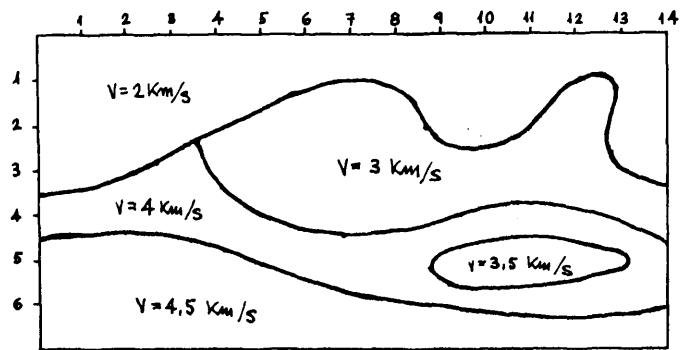


Fig. 3.- CAMPO DE VELOCIDADES

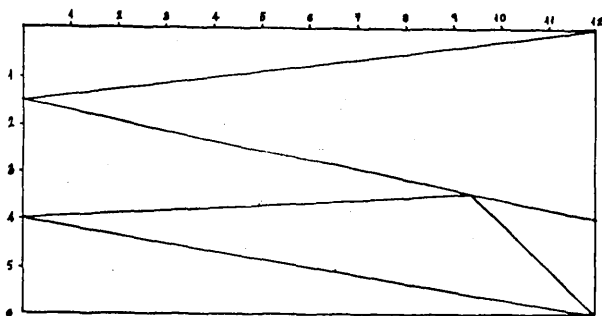


Fig. 2- MALLA CON ELEMENTOS TRIANGULARES.

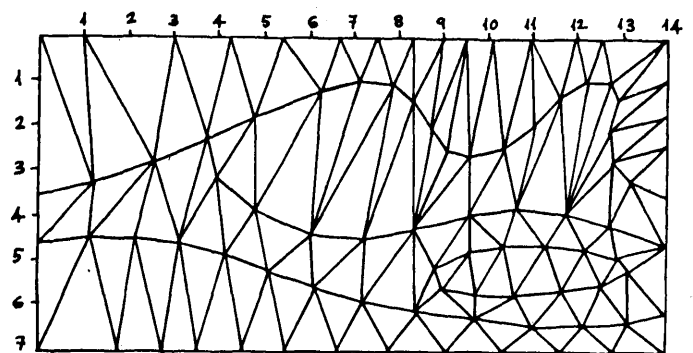


Fig. 4.- MALLA CON ELEMENTOS TRIANGULARES.

Un ejemplo más complejo es el indicado en las figuras 3 y 4. En ambos casos se observa, que el número de elementos que constituyen la malla es función de la complejidad del campo de velocidades.

PROCEDIMIENTO DEL METODO PROPUESTO

Para realizar el proceso de emigración seguiremos los siguientes pasos:

1.- Partiremos de una malla formada por elementos triangulares definida en unos ejes x-z en la que van a ser conocidas las coordenadas de los nodos. Definiremos el campo de velocidades por sus valores nodales, así como los tiempos de recorrido de cada rayo, y posicionaremos los puntos de partida de cada rayo.

2.- Comenzaremos el proceso seleccionado el primer rayo correspondiente a un horizonte y viendo el lado (o nodo) del elemento en que se encuentra el punto de partida.

Calcularemos la velocidad del punto de partida interpolando linealmente entre los valores de la velocidad en los nodos contiguos.

Calcularemos asimismo el gradiente de tiempos, el gradiente de velocidades dentro del elemento y la dirección del rayo en el punto de partida.

3.- A partir de este punto determinaremos si la trayectoria del rayo en elemento va a ser recta o circular, para ello tendremos en cuenta la dirección de partida del rayo y el gradiente de velocidades.

4.- Una vez determinado el tipo de trayectoria, los pasos a seguir son similares, en su aspecto general, en ambos casos. El paso siguiente es la determinación del punto de corte de la trayectoria del rayo con el lado del elemento al que llega.

5.- Calcularemos el tiempo empleado por el rayo en recorrer el elemento y lo sumaremos al tiempo invertido por el rayo en atravesar elementos anteriores, con lo que tendremos el tiempo global de recorrido del rayo hasta ese instante.

6.- Compararemos el tiempo transcurrido hasta ese momento con el tiempo fijado, pudiendo ocurrir dos cosas:

a) Que el tiempo transcurrido sea mayor o igual que el tiempo fijado, en cuyo caso deberemos obtener el punto correspondiente al horizonte invirtiendo el sentido de recorrido de la trayectoria del rayo hasta que el tiempo se ajuste al real. En este caso habremos terminado el proceso correspondiente a un rayo, y pasaremos al rayo siguiente.

b) Que el tiempo transcurrido sea menor que el tiempo fijado, determinaremos el elemento siguiente y el lado (o nodo) del mismo por el que entra. Calcularemos la velocidad del punto de corte en el nuevo elemento volviendo a interpolar linealmente entre los valores de los nodos contiguos y hallaremos la dirección del rayo en el nuevo elemento y el gradiente de velocidad en el mismo.

7.- El paso siguiente se reduce a la repetición del proceso a partir del punto 3 hasta que se cumpla la condición de agotamiento de tiempo fijado para cada rayo.

El proceso anterior se repite para todos los rayos de cada horizonte, y para todos los horizontes.

Con este método, lo que se obtiene son las coordenadas de puntos selectos correspondientes a un horizonte. Una vez conocidos estos puntos podremos conocer el aspecto de la geometría del horizonte.

DESCRIPCION DE LA SUBROUTINA "TRAJEC"

Como elemento representativo del programa que resuelve el problema, se muestra la subrutina TRAJEC. Esta subrutina determina si la trayectoria es recta o circular, y el tiempo transcurrido dentro de cada elemento en cada uno de los casos.

La trayectoria será recta cuando: a) el determinante de velocidades sea nulo y b) cuando el vector dirección de entrada en el elemento y el vector gradiente de velocidades, sean colineales o perpendiculares.

Para el primer caso, se calcula el módulo del vector gradiente de velocidades (GABV) y para el segundo el producto vectorial (VEC) y el escalar (ESC) de los vectores indicados.

Cuando GABV o VEC o ESC, sean nulos, la trayectoria será recta, en los demás casos, la trayectoria será un arco de circunferencia.

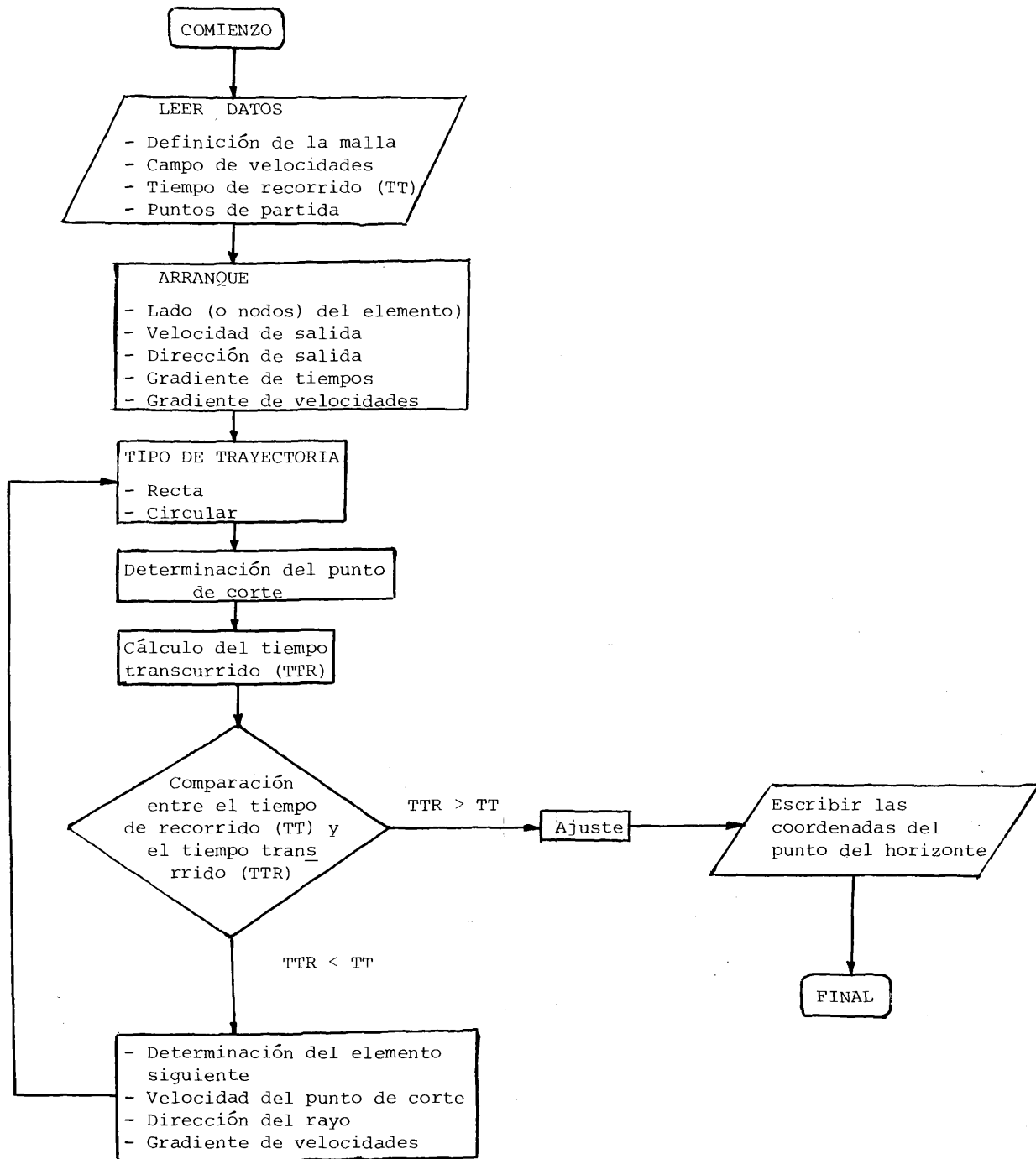
Una vez que se conoce el tipo de trayectoria en el elemento, se calcula el tiempo de recorrido en el mismo.

La fórmula empleada para el cálculo del tiempo en el caso circular, se puede encontrar en 7. Para poder utilizar dicha fórmula, es necesario conocer previamente los valores del radio de la circunferencia y de la velocidad angular del elemento, para lo cual se llama a la subrutina CIRCLE.

Para el cálculo del tiempo en el caso recto se debe tener en cuenta que GABV y VEL pueden ser nulos, y en consecuencia según los casos las fórmulas a emplear deberán ser distintas para evitar indeterminaciones.

DIAGRAMA DE FLUJO

En este apartado se esquematizan los pasos a seguir para la obtención de los puntos del horizonte explicados en el punto anterior.



```

4      C
5      C*****
6      SUBROUTINE TRAJEC(XSEC,ZSEC,TSEC,NELE,VEL,VX,VZ,I1,I2,I3,
7      4R1,R2,GABV,ESC,VECTOR,RAD,XCEN,ZCEN,XNEW,ZNEW,R3,R4,TTR,
8      2II1,I12,VEL2)
9      C*****
10     C
11     GABV=SQRT((VX)**2+(VZ)**2)
12     IF(GABV.EQ.0) GO TO 60
13     ESC=R1*VX+R2*VZ
14     VECTOR=R1*VZ-R2*VX
15     IF(ESC.EQ.0.OR.VECTOR.EQ.0) GO TO 60
16     50 CALL CIRCLE(I1,I2,I3,NELE,XSEC,ZSEC,R1,R2,VEL,VX,VZ,ESC,
17     4GABV,RAD,XCEN,ZCEN,XNEW,ZNEW,R3,R4,I1,I12,VEL2)
18     C
19     C DEFINITION OF RAY-PARAMETER
20     C
21     PARAM=1/RAD*GABV
22     C
23     C DEFINITIONS OF ARGUMENTS TO COMPUTE COSH(-1)
24     C
25     ARG1=1/(PARAM*VEL)
26     ARG2=1/(PARAM*VEL2)
27     C
28     C COMPUTATION OF COSH(-1)
29     C
30     ARGU1=ARG1**2-1
31     ARGU2=ARG2**2-1
32     ARG1=ARG1+SQRT(ARGU1)
33     ARG2=ARG2+SQRT(ARGU2)
34     ACOSH1=ALOG(ARG1)
35     ACOSH2=ALOG(ARG2)
36     C
37     C COMPUTATION OF TRAVEL TIME ALONG RAY CIRCLE
38     C
39     TTR=(1/GABV)*(ACOSH1-ACOSH2)
40     C
41     GO TO 63
42     60 CALL RECTA(I1,I2,I3,NELE,XSEC,ZSEC,R1,R2,XNEW,ZNEW,
43     4II1,I12,VEL2)
44     ARC=SQRT((XSEC-XNEW)**2+(ZSEC-ZNEW)**2)
45     IF(GABV.EQ.0) GO TO 61
46     IF(VEL.EQ.0) GO TO 62
47     TTR=ALOG(VEL2/VEL)/GABV
48     WRITE(IMP,66) VEL2,TTR
49     FORMAT (' VEL2=',F10.5/' TTR=',F10.5//)
50     GO TO 70
51     61 TTR=ARC/VEL
52     GO TO 70
53     62 TTR=ALOG(VEL2/GABV)/GABV
54     WRITE(IMP,64) VEL2,TTR
55     FORMAT (' VEL2=',F10.5/' TTR=',F10.5//)
56     64
57     70 RETURN
58     END

```

EJEMPLOS

En las figuras 5 y 6 se muestran dos ejemplos resueltos por este método: trayectoria recta con discontinuidad de velocidades (fig. 5) y trayectoria circular sin discontinuidad de velocidades (fig. 6). En ambos casos se han empleado tres rayos para definir la geometría del horizonte. En las figuras se pueden observar los tipos de malla empleados, así como la trayectoria seguida por los rayos hasta alcanzar el horizonte. El campo de velocidades viene indicado por valores nodales.

CONCLUSIONES

En este nuevo método propuesto para la resolución del proceso de emigración, mediante un método gráfico interactivo, pueden señalarse como ventajas fundamentales, las siguientes:

a.- Tiempo de resolución acorde con la complejidad del campo de velocidades, produciéndose economía de dicho tiempo, sobre todo en los casos sencillos.

b.- El número de elementos de la malla y las dimensiones de los mismos son función de la complejidad del campo de velocidades.

c.- El estudio en cada elemento se realiza de forma general e independiente. General, en cuanto a que los resultados que se obtienen en cada elemento son valores globales, referidos a la malla y al problema en conjunto, e independiente, puesto que los datos necesarios en cada elemento se obtienen a partir de valores nodales.

d.- Posibilidad de resolución del problema para un campo de velocidades cualesquiera, y por lo tanto, incluyendo los casos de discontinuidades de velocidad, que se evalúan mediante la ley de Snell.

e.- Posibilidad de extender el método al caso de tres dimensiones, sin más que elegir como elementos de la malla, tetraedros en vez de triángulos.

En conjunto resulta un método flexible, de fácil utilización e interpretación de resultados.

REFERENCIAS

1. J.F. Claerbout. "Fundamentals of geophysical data processing" Mc Graw-Hill 1976
2. J. Gazdag. "Wave Equation Migration with the phase shift method". Geophysics. V. 43 1978
3. J. Gazdag & P. Squazzero. "An interpretation of multiple offset migration in the frequency domain". IBM. Internal Report. Rome Scientific Center, 1982
4. A. Dubrulle. "Frequency-Domain Migration of zero-offset sections and related time domain

considerations". Internal Report. IBM Palo Alto Scientific Center 1982

5. E. Alarcón. "Seismic Migration by the ray tracing Method". Internal Report. IBM. Palo Alto Scientific Center, 1982
6. E. Berlhout. "Migration of Seismic Sections" Elsevier, 1982
7. A.H. Kley. "Seismic Reflection Interpretation". Applied Science, 1983

